

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-089-06

地铁上盖综合利用工程车辆基地 咽喉区自然排烟热烟试验及模拟研究

林燕枝¹ 蓝文海¹ 刘墨云² 余龙星³

(1.福州地铁集团有限公司 福州 350004;
2.福州轨道交通设计院有限公司 福州 350004;
3.福州大学 福州 350108)

【摘要】 地铁车辆基地咽喉区的排烟系统设计目前缺乏统一的规范标准,在适配排烟设施或自然排烟建筑条件的问题上,现有文献主要围绕理论与数值模拟开展,尚无相关实体实验数据支撑,采用实体火灾实验与 FDS 模拟分析相结合的方法,对地铁上盖综合利用工程车辆基地咽喉区自然排烟设计方案展开研究。针对所选试验段的研究表明:当发生 7.5MW 地铁列车火灾时,对于两侧开敞且横向宽度不大于 240m 的咽喉区,烟气可通过盖板边缘及咽喉区平交道顶部的开口向外扩散排出,尽管盖下建筑结构会导致部分区域出现烟气沉降,但烟气主要聚集于空间上部,对下部空间影响有限。火灾烟气没有蔓延到运用库,对库内人员疏散和列车设备未造成不利影响,也未对咽喉区的消防车道造成不利影响。建议带上盖综合利用工程的车辆基地咽喉区,在满足横向宽度不大于 240m 且两侧开敞的条件时,优先采用自然通风方式排烟。

【关键词】 地铁;车辆基地;上盖综合利用;咽喉区;自然排烟

中图分类号 X913.4/TU834 文献标志码 A

Study on Hot Smoke Test and Simulation for Natural Smoke Exhaust from the Throat Area of Subway Vehicle Base with Comprehensive Utilization Project in Upper Cover

Lin Yanzhi¹ Lan Wenhai¹ Liu Moyun² Yu Longxing³

(1.Fuzhou Metro Group Co., Ltd, Fuzhou, 350004;
2.Fuzhou Rail Transit Design Institute Co., Ltd, Fuzhou, 350004;
3.Fuzhou University, Fuzhou, 350108)

【Abstract】 Currently, there is a lack of unified regulatory standards for the design of smoke exhaust systems in the throat area of subway vehicle base. Regarding the adaptation of smoke exhaust facilities or natural smoke exhaust in building configurations, existing literature primarily focuses on theoretical research and numerical simulations, lacking support from physical experiment data. This study employs a combined approach of full-scale fire experiments and FDS simulation analysis to investigate the natural smoke exhaust design scheme for the throat area of vehicle base with comprehensive utilization projects in upper cover. Research on the selected test section indicates that: when a 7.5MW metro train fire occurs, for throat areas that are open on both sides with a transverse width of no more than 240m, smoke can diffuse and be exhausted through the edges of the cover plate and the openings at the top of the level crossing in the throat area. Although the building structure under the cover plate may cause smoke settling in

作者简介: 林燕枝 (1977.01-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: linyanzhi@fzmr.com

通讯作者: 刘墨云 (1976.10-), 女, 本科, 高级工程师, E-mail: 67258827@qq.com

收稿日期: 2025-08-15

some areas, smoke primarily accumulates in the upper part of the space, exerting limited impact on the lower space. The fire smoke did not spread to the operation depot, and had no adverse impact on the evacuation of personnel inside the depot, the train equipment, or the fire lane in the throat area. It is recommended that for the throat area of the vehicle base in comprehensive utilization projects, when the transverse width is no more than 240m and both sides are open, natural ventilation should be prioritized for smoke exhaust.

【Keywords】 Subway; Vehicle base; Comprehensive utilization of the upper cover; Throat area; Natural smoke exhaust

0 引言

随着城市土地资源日趋紧张,车辆基地上盖开发成为提升土地利用效率、实现功能混合开发的核心路径,在国内轨道交通建设中被广泛应用^[1]。咽喉区作为列车出入基地的区域,一端衔接正线,一端连通运用库或检修库,这种轨行区与民用建筑叠加的复杂建筑特征,决定了其在火灾防控方面存在特殊性^[2]。当前,关于咽喉区是否需设置排烟系统,规范标准尚未统一,设计实践多依赖性能化防火方案,这也引发了业内的广泛讨论^[3]。

在现行规范体系中,关于地铁车辆基地咽喉区排烟设施的设置要求存在差异。《地铁设计防火标准》(GB 51298-2018)第 8.2.7 条明确规定,车辆基地的地下停车库、列检库、停车列检库、运用库、联合检修库、镟轮库、工程车库等场所应设置排烟系统。然而,该条文说明指出其他库外以轨行区为主的交通区域基本无可燃物,亦非人员长期居留场所,且空间高大,未将排烟设施列为必要设计项^[4]。北京市地方标准《城市轨道交通车辆基地上盖综合利用工程设计防火标准》(DB11/1762-2020)第 8.3.3 条则对咽喉区排烟设置提出了要求:当咽喉区两侧开敞且横向宽度不大于 300m 时,可视为满足自然排烟的条件,不设置机械排烟系统;当横向宽度大于等于 300m 时,建议设置机械排烟系统^[5]。综上,在不同规范标准中,地铁车辆基地咽喉区设置排烟系统的前提条件与设施类型尚未形成统一意见,这给设计实践带来了不确定性。

在福州地铁上盖综合利用工程中,车辆基地咽喉区的排烟设计尚未形成标准化方案,已建成的案例大多通过性能化防火设计进行定制。以福州地铁 1 号线为例,其咽喉区与大库以消防车道划分,咽喉区划为独立的防烟分区;其中,距咽喉区盖板边缘 30m 范围内采用自然排烟,超出此范围的区域则配备机械排烟系统,排烟量按投影面积 $\times 30\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 计算。而福州地铁 4、5、6 号线的咽喉

区则选择不设排烟系统,通过咽喉区与其他排烟区域间设置 2m 高挡烟垂壁,实现烟气分区控制。两种截然不同的设计思路,反映出工程实践中对咽喉区是否需要设置排烟设施以及如何量化排烟设计参数的差异化考量。

当前业内针对地铁上盖综合利用工程中车辆基地咽喉区的排烟设施配置必要性尚存分歧。一方观点认为:咽喉区作为列车通行过渡区域,无固定列车停留且可燃物极少,同时非工作人员常态化作业场所,可不予考虑排烟设计^[6];另一方则强调:咽喉区与运用库等功能区域直接连通,若列车在咽喉区突发火灾并因动力丧失滞留,火灾烟气将通过连通空间迅速蔓延至运用库,对库内人员安全与列车设备构成直接威胁,故排烟系统设置具有必要性^[7]。在现有的相关研究中,未有针对地铁盖下咽喉区开展的实体火灾试验,相关的实验数据尚处于空白状态,本文基于消防设计中“最不利工况”原则,结合灾后运营恢复效率考量,认为有必要对咽喉区进行排烟设计。为此,围绕自然排烟模式开展实体火灾试验与 FDS 数值模拟,系统探究满足烟气控制条件的适配自然排烟相关建筑条件参数,为工程设计提供量化依据。

1 实体火灾试验

本次实体火灾试验选择在福州螺洲车辆基地咽喉区开展。螺洲车辆基地咽喉区宽度为 234m,长度为 495m,盖下净空为 6.8m,南北两侧开敞,以咽喉区与运用库、检修库等建筑物之间的平交道作为消防车道,消防车道顶部均匀设置开口,在调机库边设置消防回车场,顶部设置面积为 104m²的开口。

本次试验设置 1 处火源,综合考虑烟气可能蔓延的范围以及对人员的疏散造成最不利影响的情况,火源设置于咽喉区中部,火源中心距盖板南、北两侧边缘的水平距离为 117m。根据《地铁设计

防火标准》(GB 5129-2018) 地铁列车的设计火灾规模通常取 7.5MW~10.5MW^[4], 为降低试验对螺洲车辆基地的影响, 本次燃料采用无水乙醇, 火源功率为 3.0MW, 并采用烟饼作为发烟装置模拟火灾。试验方法遵循《防排烟系统性能现场验证方法热烟试验法》XF/T 999-2012^[8]。

为有效观测火灾发生后, 烟气在自然通风条件下的积聚及蔓延情况, 在咽喉区盖下区域共设置如

图 1 所示的 7 个观测点位: 1#观测点设置于火源正南方向的盖板外侧, 用于观测烟气抵达盖板边缘的时间; 2#、5#、6#观测点环绕火源布置, 就近记录火源从点火至熄灭期间的烟气形态变化; 3#、4#观测点设置于运用库周边的消防车道(临近上部开口), 用于评估烟气对运用库的影响; 7#观测点设置于消防回车场, 用于评估烟气对救援核心作业区域的影响。

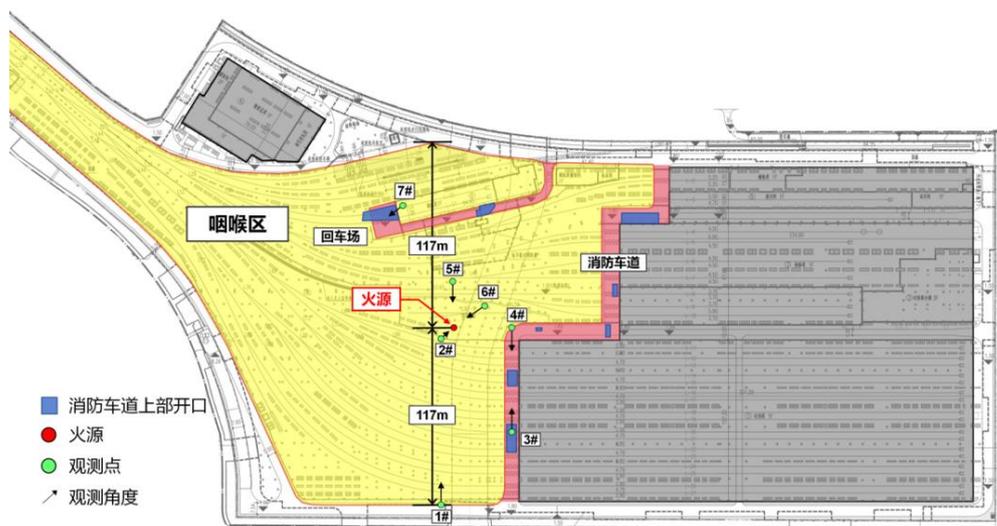


图 1 咽喉区盖下的火源位置及观测点位示意图

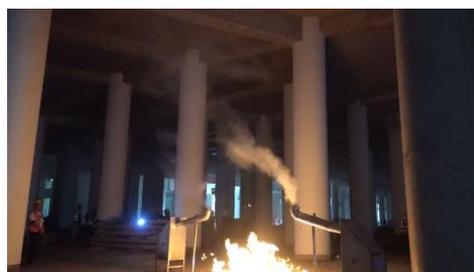
Fig.1 Schematic diagram of the fire source location and observation points under the cover plate in the throat area

点火后, 火源产生的烟气呈轴对称羽流向上运动。试验进行约 15min 后, 火焰变小, 随后逐渐熄

灭, 如图 2 所示。



(a) 点火瞬间的火源状态 (5s)



(b) 点火约 15min 后的火源状态

图 2 试验火源状态

Fig.2 Test fire source state

火灾发生后, 烟气主要集中在盖下咽喉区, 该区域设有大量的结构梁和柱, 对烟气蔓延产生一定的遮挡作用, 其中 1#、2#、4#、7#观测点的烟气蔓延情况如图 3 所示。在试验进行到约 12.0min, 1#观测点附近能观测到烟气前锋到达, 如图 3 (a)

所示; 在试验进行到约 0.5min, 烟气蔓延至 2#观测点附近, 如图 3 (b) 所示; 在试验进行到约 6.0min, 烟气蔓延至 4#观测点附近, 如图 3 (c) 所示; 在试验进行到约 6.5min, 7#观测点观测到烟气蔓延至消防车回车场地附近, 如图 3 (d) 所示。

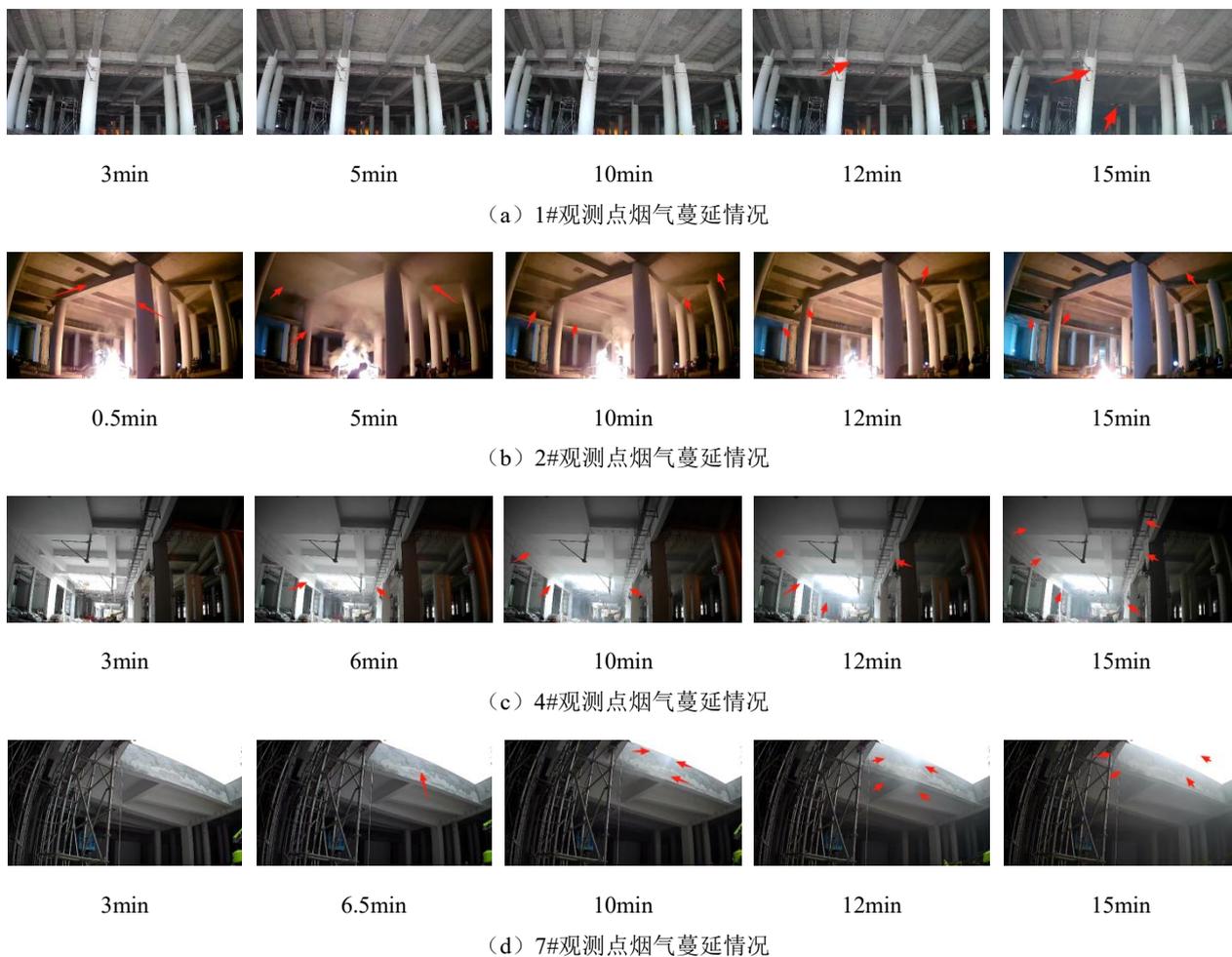


图3 1#、2#、4#、7#观测点烟气蔓延情况

Fig.3 Smoke spread situation at observation points 1#, 2#, 4#, 7#

通过对实体火灾试验结果进行分析,可得到如下结论:

(1) 试验结果表明,咽喉区发生火灾后,烟气主要集中在盖下咽喉区蔓延,在现场观测可见,烟气主要集中在空间上部,对下部空间整体影响较小。

(2) 盖板下方的烟气可通过盖板上的开口以及周围开敞区域顺利排出。

(3) 火灾烟气没有蔓延到运用库,对库内人员疏散和列车设备未造成不利影响。

(4) 火灾烟气未对咽喉区的消防车道造成不利影响。

值得注意的是,由于本次全尺寸实体实验采用较小火源功率(3MW)开展,虽然产烟量较少,其火灾自身火羽流热浮力也较小,更不利于自然排烟。理论上,较大的火源功率,火羽流热浮力也较

强,越有利于保持烟气层高度。虽然其产烟量较大,但是在本文自然排烟口较多的半封闭空间中,不存在烟气积蓄难以排除的问题,火源功率较大将更有利于自然排烟。因此,为保证结论的科学性和普适性,下文将开展 FDS 数值模拟以进一步探究上述结论是否适用于更大火源功率情况。

2 FDS 模拟研究

采用 FDS 软件进行试验工况模拟,模拟火源位置与实体火灾实验设置一致,综合考虑烟气可能蔓延的范围及其对人员疏散造成最不利影响的情况,设置模型的初始工况,如表 1 所示。网格划分采用非均匀网格划分方法,根据 FDS 用户使用手册,当网格尺寸介于 $[D^*/16, D^*/4]$ 时模拟结果较为准确。其中火灾特征直径 D^* 的计算公式如文献[10]所示,计算得到的网格尺寸应介于 0.13~0.54m。综

合考虑计算效率和经济性, 本研究在火源附近区域的网格尺寸设置为 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m} \times 0.5\text{m}$ 。其他区域的网格尺寸设置为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$;

表 1 FDS 数值模拟设定火灾场景

Table 1 FDS numerical simulation set fire scenarios

火源类型	最大火灾热释放速率 /MW	火灾增长系数 / (kW/s^2)	排烟系统	自动喷水灭火系统	环境条件
快速火	7.5 ^[9]	0.04689	自然排烟	无	初始温度 20℃, 无风

如图 4 所示, 在模拟实验中, 烟气形态及蔓延方式与实体实验基本保持一致: 火灾发生后, 烟气以轴对称烟羽流形式上升, 烟气到达顶板后在顶板下积累厚度并向四周蔓延。烟气主要集中于咽喉区空间上部, 形成烟气层, 火灾发生后的 900s 内,

烟气陆续到达消防车道、消防回车道及盖板边缘, 在 1200s 时, 充满整个咽喉区。烟气通过盖板侧边开口、消防车道及消防回车道顶部开口排出, 未蔓延至运用库区域。

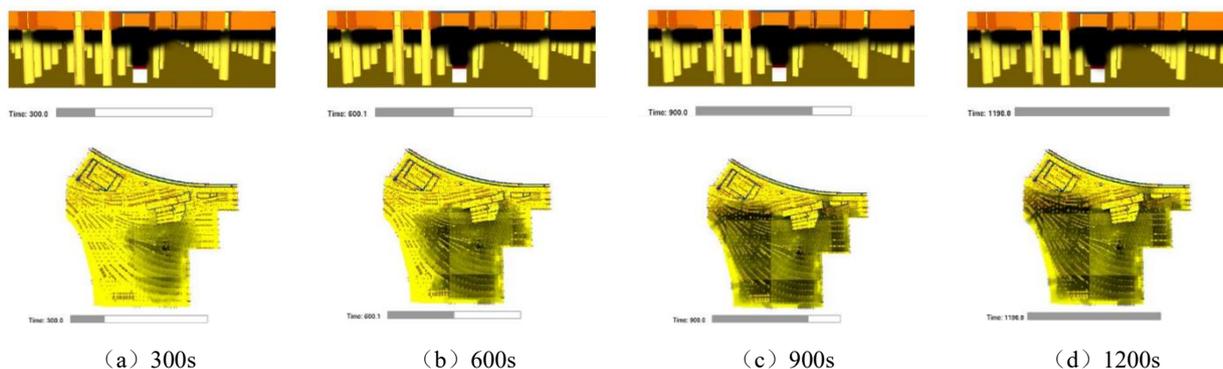


图 4 烟气蔓延情况模拟结果

Fig.4 Simulation results of smoke spread situation

选取疏散人员活动中影响主要指标能见度、温度以及 CO 浓度进行模拟, 2.5m (清晰高度 2.28m) 的高度切面展开分析。

如图 5 所示, 咽喉区能见度除火源上方的空间和局部距离火源较远自然通风不利的区域, 能见度

下降到 20m 外, 大部分区域能见度不低于 30m 。由此可见, 在火羽流热浮力作用下, 烟气集中主要在上盖顶部, 咽喉区清晰高度处的能见度大于 10m , 未达危险状态。

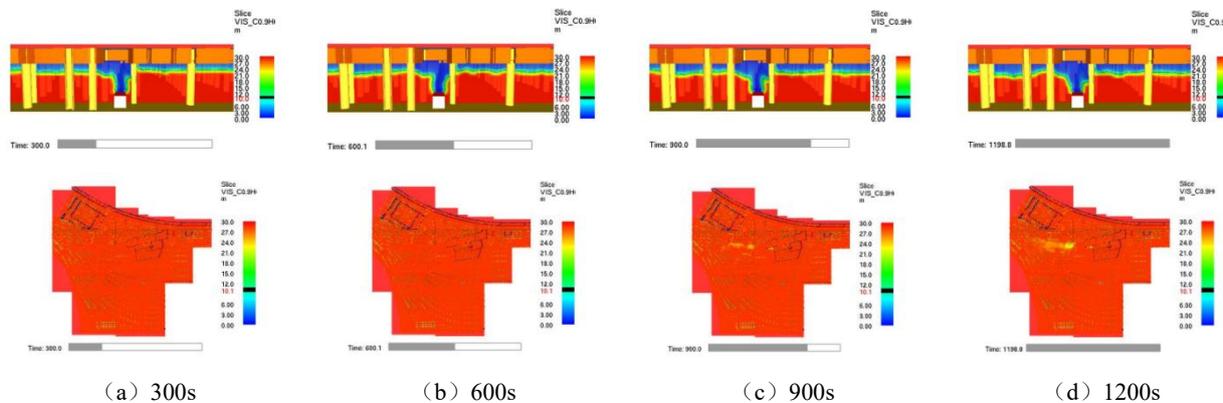


图 5 能见度模拟结果

Fig.5 Simulation results of visibility

如图 6 所示, 除火源上方外, 温度最高不超过 30°C 。由此可见, 自然排烟状态下烟气得到有效疏

导, 未引发大范围高温扩散, 远未达火灾中人体安全极限温度 60℃, 说明火灾期间人员疏散的温度

环境具有安全保障。

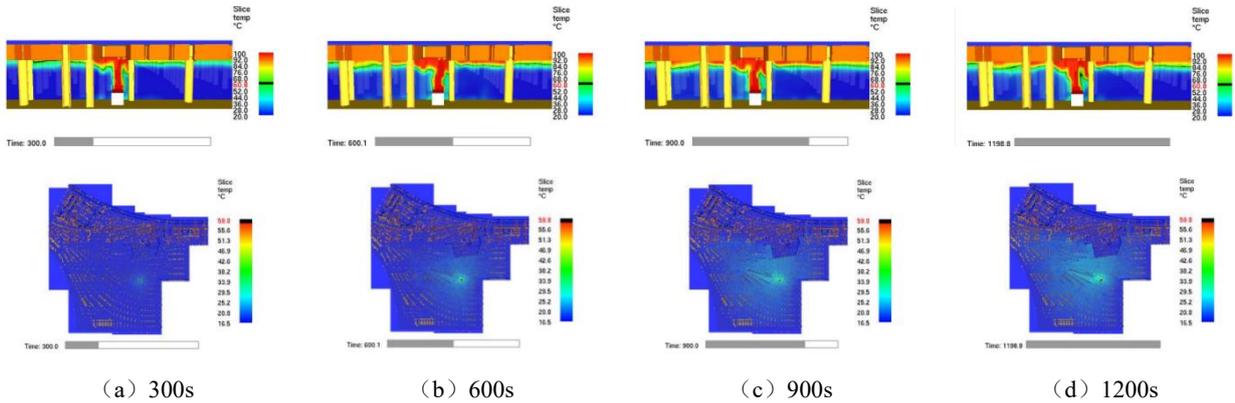


图 6 温度模拟结果

Fig.6 Simulation results of temperature

如图 7 所示, 尽管火源正上方的空间及局部自然通风不利的区域的 CO 浓度达到 $2.0 \times 10^{-6} \text{mol/mol}$ (2ppm), 大部分区域的 CO 浓度仍维持在

$1.4 \times 10^{-6} \text{mol/mol}$ (1.4ppm) 以下, 浓度水平均显著低于 500ppm 的人员短期疏散耐受限值, 未对疏散安全有不利影响。

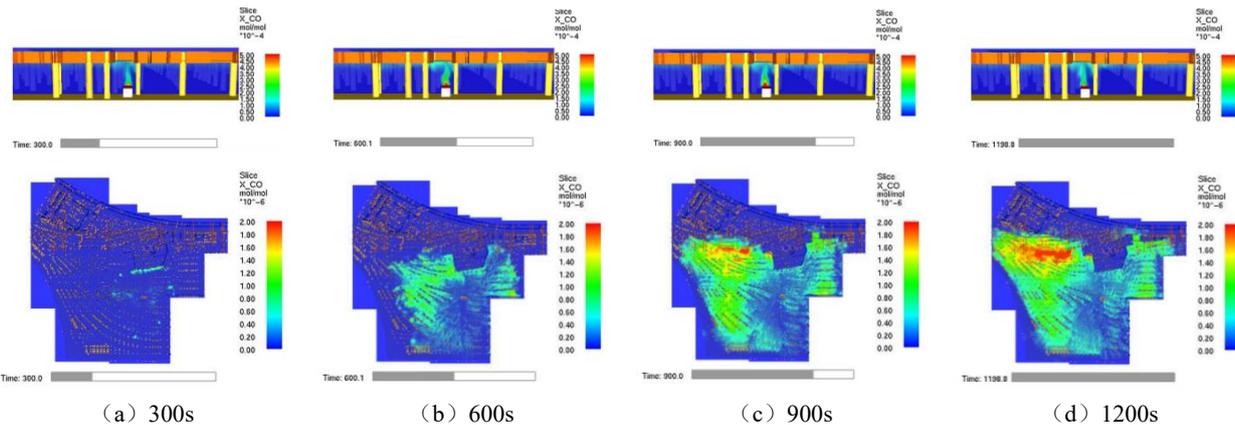


图 7 CO 浓度模拟结果

Fig.7 Simulation results of CO concentration

基于上述模拟结果可知, 当发生 7.5MW 的火灾时, 对于试验对象此类咽喉区两侧基本处于开敞状态, 且横向最大宽度为 240m 的车辆基地而言, 自然排烟模式是有效适配的。

筑条件允许的情况下, 宜优先采用自然排烟方式。

3 结论

咽喉区作为列车通行区域, 虽无列车长期停留、无大量可燃物堆积且无人员常态化作业, 但因其与运用库等区域相连且无实体分隔, 存在潜在安全隐患。一旦列车在咽喉区突发火灾并失去动力滞留, 火灾产生的烟气极易蔓延至运用库, 威胁库内人员安全与列车设备安全。鉴于此类火灾事故发生概率较低, 同时为实现灾后快速排烟、恢复生产, 在建

试验与模拟分析数据显示, 当咽喉区两侧开敞且横向宽度不大于 240m 时, 即便发生地铁列车火灾, 烟气可通过盖板边缘开口、咽喉区平交道顶部开口向四周扩散排出。虽部分区域受盖下建筑结构影响会出现局部烟气沉降, 但烟气主要聚集于空间上部, 对下部空间影响有限。火灾烟气没有蔓延到运用库, 对库内人员疏散和列车设备未造成不利影响, 火灾烟气也未对咽喉区的消防车道造成不利影响。

基于上述研究结论, 建议带上盖综合利用工程的车辆基地咽喉区, 在满足横向宽度不大于 240m 且两侧开敞的条件时, 优先采用自然通风方式排烟。

(下转第 154 页)